

# Magnetschwebetechnik

Weh, Herbert

Veröffentlicht in:  
Jahrbuch 1994 der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.31-43



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

HERBERT WEH, Braunschweig

## **Magnetschwebetechnik**

Braunschweig, 08. April 1994\*

### **Einleitung**

#### **Rad und Schiene oder verschleißlose Stützung**

Die heutige Verkehrstechnik basiert auf der Anwendung des Rades und für alle Bahnen wird bis heute die Stütztechnik in der Kombination Rad/Schiene eingesetzt. Die Erfindung des Rades, die auf die Sumerer zurückgeht und etwa 5000 Jahre vor unserer Zeit stattfand, dient der Verminderung der Reibkräfte. Bereits das Wagenrad aus Holz unterlag vielen Entwicklungsstufen, die der zweckmäßigen Ausführung mit Rücksicht auf Funktion und Materialeinsatz dienten und schon einen hohen Grad an (wohl überwiegend empirisch begründeter) Ingenieurkunst verraten. Die Anwendung von Speichen und der Übergang zu fasergerecht ausgeführten Radkränzen läßt starke Gewichtsreduktionen zu, die Einsatzmöglichkeiten und Betriebsverhalten beim Pferdewagen sehr günstig beeinflussen. Beim Antrieb durch das Pferd sind offensichtlich Stütz- und Vortriebsfunktion örtlich separiert.

Die Erfindung der Dampfmaschine und deren Integration in Schienenfahrzeuge bringt den Übergang zur Nutzung einer Dreifachfunktion des Rades (Bild 1). Neben der reibungsarmen Übertragung von Stützkräften übernimmt das Rad mit Hilfe des Spurranzes (im Zusammenwirken mit der Schiene) die seitliche Führung und vermöge der Drehmomentbereitstellung durch die Dampfmaschine die Übertragung der Vortriebskräfte. Lokomotiven als zugkrafterzeugende Maschinen sind auch in der modifizierten Form für elektrischen Betrieb grundsätzlich auf die beschriebenen Hauptfunktionen des Rades angewiesen. Die Leistungsfähigkeit des Antriebs, aber auch Ausführung und Kraftübertragbarkeitsgrenzen des Rades bestimmen erzielbare Höchstgeschwindigkeiten ebenso wie Beschleunigungen und Bremsverzögerungen. Die dem System Bahn zuzuschreibende Betriebssicherheit wird in Grenzfällen wesentlich durch den Reibkontakt zwischen Rad und Schiene markiert.

Die Magnetschwebetechnik hingegen ist eine berührungsfreie Technik, die sich der Kraftübertragung mit Hilfe magnetischer Felder bedient. Sie ist damit reibungsunabhängig und verschleißfrei, jedenfalls solange störungsbedingte Berührungen ausgeschlossen werden können. Als Aufgabe sind die genannten drei Funktionen vertikale Stützung, horizontale Führung und Antriebskraftübertragung zu erfüllen. Denkbar sind hierfür sowohl getrennte Funktionselemente als auch kombinierte Funktionen in integrierten Elementen. Der Wegfall des Rades läßt erwarten, daß die durch die Technik und Beanspru-

---

\* Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

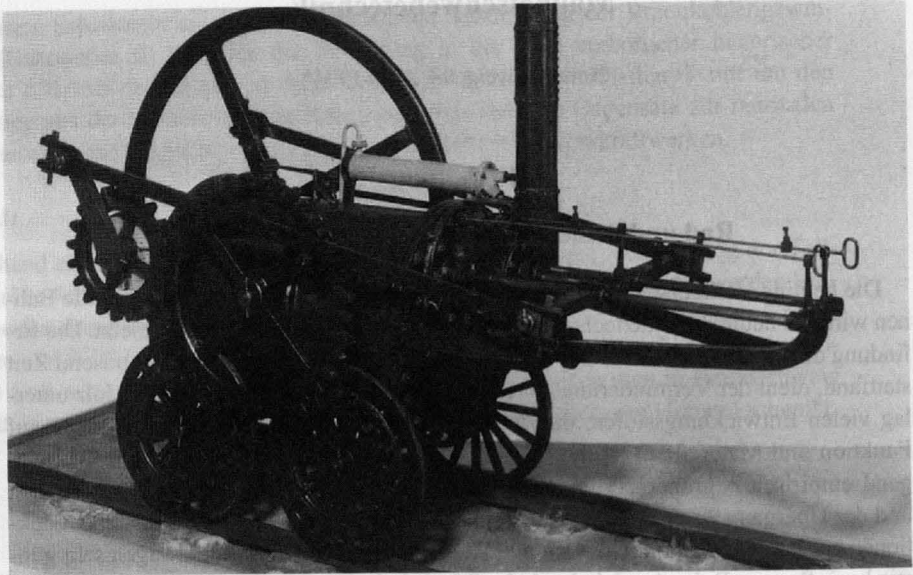


Bild 1  
Dampflokomotive, 1830

chung des Rades bestehenden Grenzen, wie (fliehkraftbedingte) Höchstgeschwindigkeit oder Beschränkung der Steigfähigkeit, überwunden werden können. Die Punktberührung, die beim Rad mit höchster mechanischer Beanspruchung und der Anregung von Schwingungen verbunden ist, wird bei der Schwebetechnik durch eine großflächigere Kraftübertragung mit weit geringeren Schwankungen und Beanspruchungen ersetzt.

### **Zur Chronologie der Magnetschwebetechnik (Tabelle 1)**

Die Erfindung des elektrischen Linearantriebes reicht ins vorige Jahrhundert zurück. Sie ist die Grundlage für die berührungslose Bewegung von Körpern und stimulierte die Denkansätze für Bahnen mit Magnetschwebetechnik. Zunächst wurden zu Beginn des 20. Jahrhunderts stabil wirkende Magnet-Stütztechniken vorgeschlagen, da an eine regelungstechnische Stabilisierung (instabiler) anziehend wirkender Kräfte nicht zu denken war. Ein erstes Schwebemodell basierte 1912 auf der abstoßenden Wirkung zwischen Strömen eines Zwe Wicklungstransformators mit der (mehrfach angeordneten) Primärwicklung auf dem Fahrweg und einer Aluminiumschiene anstelle der Sekundärwicklungen auf der Fahrzeugseite. Zwischen den (nahezu) gegenphasig verlaufenden Primär- und Sekundärströmen entstehen sich abstoßende Kräfte, die im Wechselspiel mit dem Fahrzeuggewicht eine stabile Gleichgewichtslage ergeben. Kennzeichnendes Merkmal der Anordnung ist eine unvertretbar hohe Leistung auf der Primärseite (große Blindleistung, große Verluste). Das Problem der Seitenführung des Fahrzeugmodells wurde me-

chanisch gelöst; ein Linearmotor war nicht eingebaut. Die Chronologietabelle zeigt weitere Entwicklungsstufen. Es wurde in den dreißiger Jahren von H. Kemper die regelungstechnische Stabilisierung von elektrisch erregten Magnetkreisen und deren Anordnung zur Fahrzeugstützung vorgeschlagen, wobei auf der Fahrzeug- und der Schienenseite ferromagnetisches Material (Eisen) verwendet wird (Bild 2). Ihr Vorteil liegt in der bei kleinem Spalt geringen notwendigen Stromsumme der Spule. Die daraus folgenden ver-

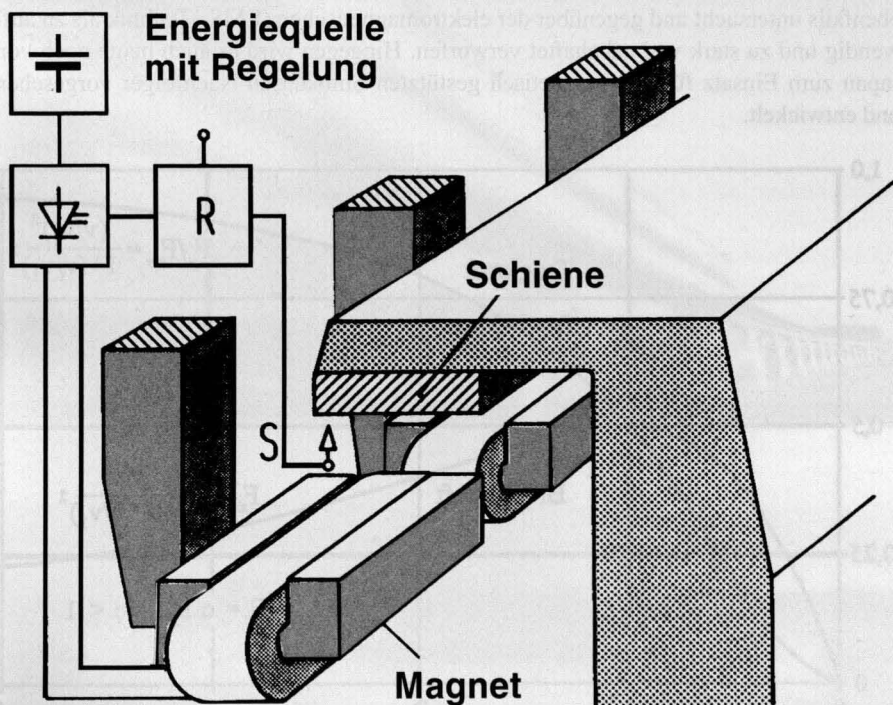


Bild 2  
EMS-Tragverfahren (Kemper) 1933

hältnismäßig kleinen Leistungen zur Erzeugung der Tragkräfte lassen besonders diese Art der Schwebevariante wirtschaftlich erscheinen. Der zu zahlende Preis besteht hauptsächlich in der Ausgestaltung des elektrischen Kreises und dessen Regelbarkeit mit Hilfe schnellwirkender elektronischer Elemente. Die von H. Kemper auch zum Patent angemeldeten Vorschläge ließen sich zum damaligen Zeitpunkt technisch nicht realisieren, da leistungsfähige und zugleich zuverlässige Verstärker nicht verfügbar waren. So verwundert es nicht, daß auch noch spätere Vorschläge der Entwicklung und Verbesserung der stabil wirkenden Stütztechnik galten. Hierzu gehört insbesondere die Anwendung der Supraleitung (Braunbeck, Powell und Danby), wobei das Ziel darin bestand, die hohen Verluste, die durch die notwendigen großen Ströme bedingt sind, wenigstens auf der Fahrwegseite zu reduzieren bzw. zu eliminieren. Allerdings verbleibt beim Einsatz der

Supraleiter auf der Fahrwegseite noch ein erheblicher Anteil der verlustbehafteten Normalleitung in den Spulen des Fahrwegs. Es kommt auch der Nachteil hinzu, daß nun aufgrund der Gleichstromerregung, der zur Stromerzeugung im Fahrweg notwendige Induktionsvorgang geschwindigkeitsabhängig ist und somit bei kleinen Geschwindigkeiten unwirksam wird. Dies bedeutet, daß dort die Stützfunktion verschwindet (Bild 3). Sie muß durch konventionelle Mittel, also das Rad, behelfsmäßig übernommen werden. Dieses als elektrodynamisches System (EDS) bekannte Verfahren wurde in Deutschland ebenfalls untersucht und gegenüber der elektromagnetischen (EMS-)Technik als zu aufwendig und zu stark verlustbehaftet verworfen. Hingegen wird es auch heute noch von Japan zum Einsatz für den magnetisch gestützten Shinkansen-Nachfolger vorgesehen und entwickelt.

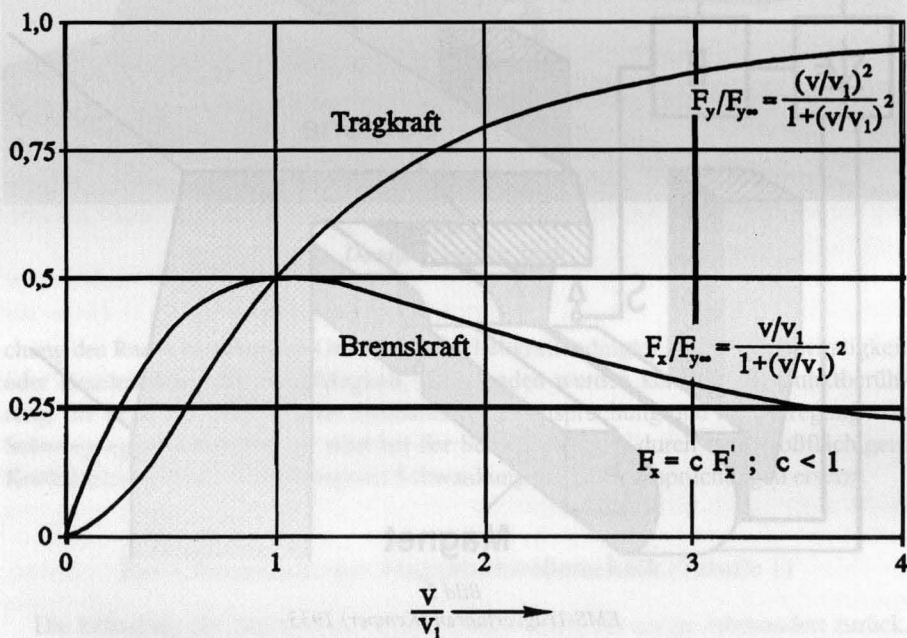


Bild 3  
Trag- und Bremskraftfunktion bei EDS

Ein nicht unwichtiger Beitrag zur praktischen Anwendbarkeit von Linearantrieb und Magnetstütztechnik kam durch die Braunschweiger Beiträge zustande. Sie galten dem Ziel, möglichst geringe Zusatzmassen im Fahrzeug dadurch zu erreichen, daß Stütztechnik und Antrieb in einer Funktionseinheit integriert und durch ein einziges magnetisches Feld bewirkt werden. Die leistungsführenden Antriebskomponenten sind auf die Fahrwegseite verlegt und belasten nicht das Fahrzeug. Vergleichende Untersuchungen zwischen verschiedenen Systemvarianten hatten gezeigt, daß nur so die gewünschten hohen Geschwindigkeiten von etwa 500 km/h erreicht werden können. Somit wurde nach ei-



nem BMFT-Entscheid 1977 die zunächst auf anderer Grundlage begonnene Entwicklung von Transrapid-Fahrzeugen auf diese neue Technik umgestellt. Auch die heute auf der Versuchsanlage im Emsland operierenden Fahrzeuge basieren auf der Integrierten Trag/Antriebs-Technik. Im Bild 4 ist das erste Labormodell aus dem Jahre 1972 darge-

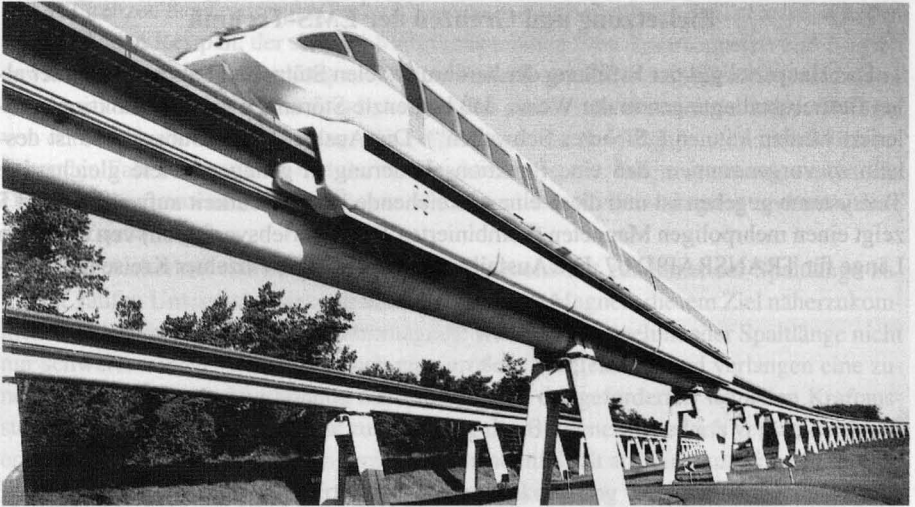


Bild 4a  
TRANSRAPID

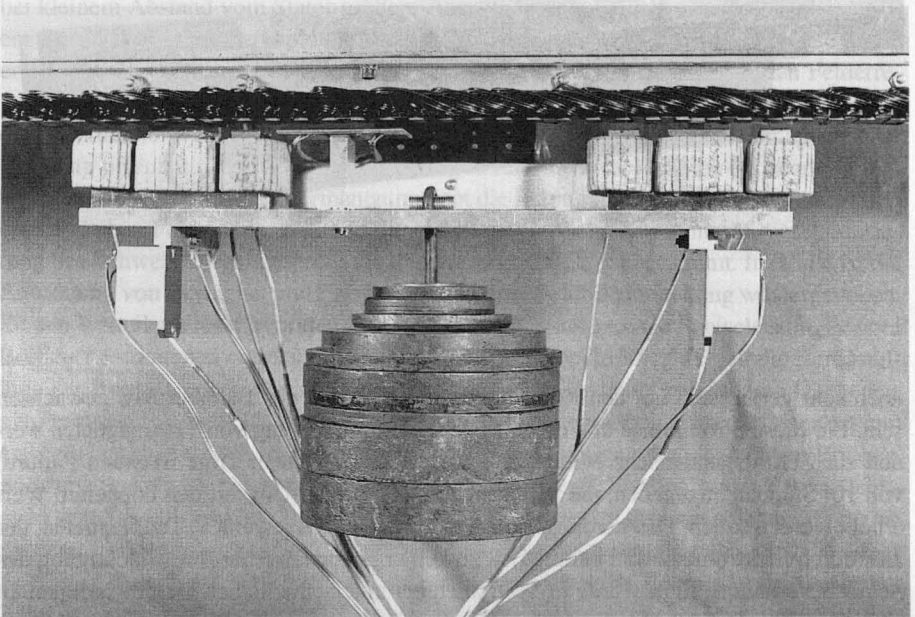
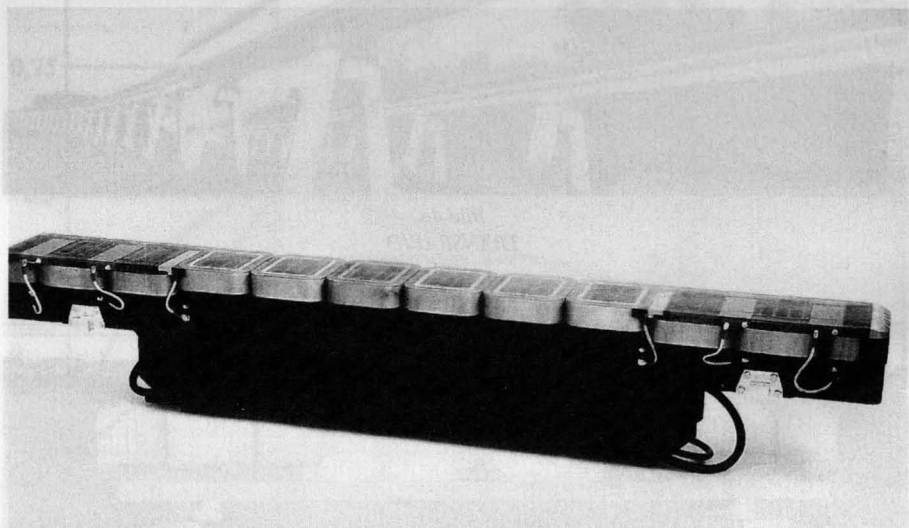


Bild 4b  
Erstes Funktionsmodell für Integrierte Trag-Vortriebstechnik, IEM 1972

stellt. Nur die seitlichen Führkräfte werden durch ein gesondertes Magnetsystem in Wechselwirkung mit massiven Führschiene(n) (an der seitlichen Trägerbegrenzung) gebildet.

### **Zielsetzung und Grenzen der EMS-Technik**

Das Hauptziel gilt der Erfüllung der berührungsfeien Stütz- und Fahrtechnik unter allen Betriebsbedingungen in der Weise, daß begrenzte Störungen von Teilfunktionen toleriert werden können („Sicheres Schweben“). Die Auslegung der Subsysteme ist deshalb so vorgenommen, daß eine Funktionsgliederung in genügend viele gleichartige Teilsysteme gegeben ist und diese eine ausreichende Überlastbarkeit aufweisen. Bild 5 zeigt einen mehrpoligen Magneten (kombiniertes Trag-/Antriebsverfahren) von etwa 3 m Länge für TRANSRAPID 07. Die Ausfallwahrscheinlichkeit einzelner Kreise muß den-



*Bild 5*  
*Tragmagnet TR 07*

noch sehr gering sein um den Robustheitsanforderungen des Bahnbetriebs gewachsen sein. Für diese Stromkreise und deren Elektronik zur Speisung von Tragmagneten werden zur Zeit als statistische Mittelwerte MTBF-Zeiten (Mean Time Between Failure) von  $10^4$  Stunden angegeben, die in abschbarer Zeit mindestens auf den doppelten Wert erhöht werden sollen. Daß der mögliche Ausfall eines (von jeweils 8) Teilmagneten, der z.B. durch Elektronikstörfall bedingt ist, zu keiner nennenswerten Beeinträchtigung des Schwebeverhaltens führt wurde in Testreihen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten nachgewiesen. Die von den Nachbarmagneten vorübergehend aufzubringenden Zusatzkräfte lassen sich dabei mit noch ausreichender Dynamik bereitstellen.

Verschiedene Überwachungsschaltungen sorgen dafür, daß kritische Zustände erkannt und vermieden werden. Besondere Überwachungssorgfalt gilt der Vermeidung von unerwünschten Berührungen zwischen Magnet und Reaktionsschiene bzw. dem Stator des Antriebsaggregates.

Die Grenzen der Transrapid-Technik werden markiert durch die Spaltreserve, d.h. den verbleibenden Restspalt, der sich bei Mehrfachausfällen (von Tragmagneten und Antrieb sowie gleichzeitiger Absenkung eines Statorpakets um mehrere Millimeter) und unter der Annahme höchster Geschwindigkeit ergibt. Dieser Mindestwert ist auch abhängig von den durch die Trägerstützung, die Trägerlänge und dem Temperatureinfluß sich ergebenden Fahrwegkonturen und der für die Auslegung der Tragmagnete relevanten, die Dynamik bestimmenden Faktoren wie Kraftkennlinie, Stellerauslegung und maximale Bordnetzspannung.

Da die Sicherheit des berührungslosen Schwebens mit zunehmender Spaltlänge zunimmt, laufen Untersuchungen um durch wirksamere Magnete diesem Ziel näherzukommen. Die bisher verwendeten Elektromagnete werden mit zunehmender Spaltlänge nicht nur schwerer sondern benötigen auch eine größere Tragleistung und verlangen eine zunehmende Spannungsüberhöhung zur Aufbringung der geforderten schnellen Kraftaussteuerung. Hinzu kommt, daß die zur Deckung des Bordenergiebedarfs verwendete generatorische Leistungseinkopplung mit zunehmendem Spalt an Wirksamkeit verliert. Das genannte Speiseverfahren basiert dabei auf der Einkopplung von Spannungen, die durch Felddichteschwankungen in einer geeigneten Polwicklung entstehen und von der Nutzung des Stators verursacht werden. Die Lineargenerator-Wicklung „sieht“ naturgemäß bei kleinem Abstand vom Stator größere Amplituden der Feldschwankung als bei großem Abstand. Ein großer Spalt erfordert also gleichzeitig eine leistungsärmere Felderzeugung und damit eine Abkehr vom Prinzip der rein-elektromagnetischen Felderregung. In Braunschweig durchgeführte Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, daß die Kombination von Feldkomponenten aus Permanentmagnet und elektromagnetischer Erregung offenbar die besten Voraussetzungen für eine zweckmäßige Anwendung bieten. Hierbei übernimmt der Permanentmagnet die Erzeugung des für stationären Betrieb erforderlichen Feldanteils, während die elektromagnetische Komponente die Stabilisierung des Schwebevorganges, also die dynamischen Effekte, übernimmt. In Bild 6 ist die Anordnung von P-Magnet und Erregerspule in einer Feldbilddarstellung wiedergegeben. Zu den Vorteilen dieser hybriden Erregung zählt, daß nur geringe Speiseleistungen vom Bordnetz entnommen werden müssen und somit auch bei größerem Spalt die Bereitstellung der Bordnetzenergie keine Probleme verursacht. Die heute verfügbaren Hochenergie-Permanentmagnete lassen günstige Magnetentwürfe mit begrenzten Massen zu und ermöglichen in Verbindung mit entsprechenden Auslegungen der elektrischen Erregwicklung und der Leistungselektronik auch ein „Sicheres Schweben“ unter Berücksichtigung von Störfallaspekten. Wie die Untersuchungen zeigen, sind mit solchen Magneten mittlere Spaltlängen von etwa 2 cm ausführbar. Hierdurch besteht dann auch die Möglichkeit, ein verbessertes Regelungskonzept einzuführen, bei dem nicht mehr wie zur Zeit vorwiegend auf konstanten Spalt geregelt, sondern minimale Magnetbeschleunigungen angestrebt werden. Das Schwebekonzept mit minimaler vertikaler Magnetbeschleunigung



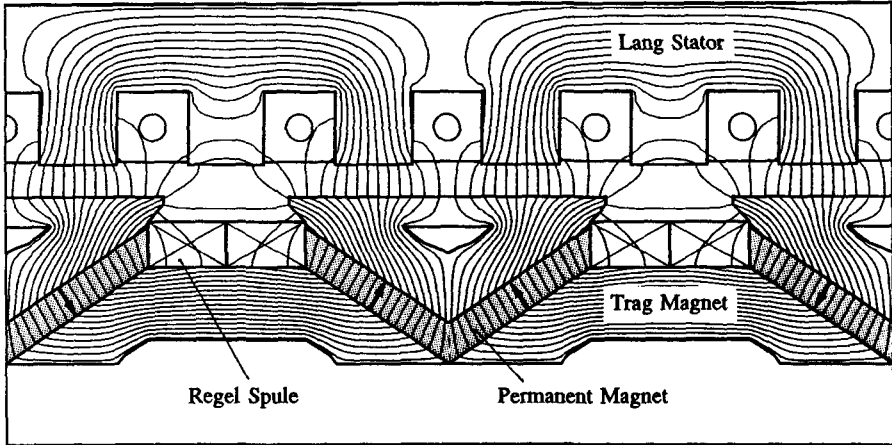


Bild 6  
Geregelter Permanent Magnet  
(Feldbild)

nigung (gelegentlich „Plattformfahren“ genannt) weist weitere Vorteile wie z.B. geringere Schwingungsanregung der Fahrgastzelle und günstigere Bemessung der Elektronik sowie kleine Bordnetzleistung auf. Erwähnt soll werden, daß auch in den USA die Anwendung der TRANSRAPID-Technik erwogen wird und zur Anpassung an die dort gegebenen Bedingungen (in erdbebenträchtigen Gebieten) an nennenswerte Spaltvergrößerungen (auf 5 cm) gedacht wird. Hierzu liegen Vorschläge der Firma Gruman vor, die einen Magnetentwurf mit supraleitender Spule anstelle des von uns vorgeschlagenen Permanentmagneten vorsieht.

Es wurde bereits erwähnt, daß die Magnetschwebetechnik nicht den Geschwindigkeitsgrenzen unterliegt, die den Einsatz des Rades beschränken. Allerdings müssen auch bei der Magnetschwebetechnik, die mit zunehmender Geschwindigkeit sich verschärfenden Ansprüche an die schnelle Aussteuerbarkeit der Magnete erwähnt werden. Hinzu kommt, daß selbstverständlich der für den Antrieb bereitzustellende Energiebedarf (quadratisch) mit der Geschwindigkeit wächst. Die Energieaufbereitung mit den Mitteln der Leistungselektronik erfordert somit ebenfalls erhöhten Aufwand. Es mag interessieren, daß zur Zeit an Entwürfen für ein EMS-Hochgeschwindigkeits-Versuchsgerät zur Anwendung für Prüfzwecke anstelle von Raketenschlitten gearbeitet wird, wobei die Höchstgeschwindigkeit in Stufen bis auf 3 Mach ausgedehnt werden soll. Verständlicherweise steht der elektrische Antrieb noch mehr als die ebenfalls einzusetzende EMS-Schwebetechnik im Vordergrund. Neben der extremen Geschwindigkeit ist dabei die Erzielung von sehr hohen Schubkräften, ähnlich jener des Raketenantriebs, die große Herausforderung. Die Kurzzeitbelastung der Langstatorwicklung mit sehr hohen Stromdichten und der Einsatz von Permanentmagneten auf der Fahrzeugseite ermöglicht Beschleunigungen auch im Bereich zwischen der 5- und 10-fachen Erdbeschleunigung. In unserem Braunschweiger Labor wurden für Einsatzzeiten von wenigen Millisekunden

an kleinen Massen (im Bereich unter 100 Gramm) durch Linearantriebe Beschleunigungen von mehr als  $10^4$  g erzielt. Die hierbei den Leitern der Wicklung zugemuteten Stromdichten lagen oberhalb von  $2 \cdot 10^3$  A/mm<sup>2</sup> und damit höher als bei Anwendung der Supraleitung. Auch die zur Kraftbildung benötigte hohe Dichte des magnetischen Feldes von fast 20 Tesla übersteigt die bei Supraleitung in technischen Geräten anwendbaren Felddichten. Diese Zahlen zeigen die in Sonderfällen aus heutiger Sicht darstellbaren Höchstwerte und lassen erkennen, daß bezüglich der Kraftdichte die Anforderungen in der Magnetschwebe-Verkehrstechnik am unteren Ende der Skala liegen. Sowohl die tangentialen Kraftdichte zur Erzeugung der Schubkraft als auch die Kraftdichte in vertikaler Richtung, die die magnetische Stützung bewirkt, sind verhältnismäßig niedrig und werden mit geringen Stromdichten in den jeweiligen Wicklungen erzeugt. Da die Strombelastung der Vortriebswicklung sehr gering ist, besteht die Möglichkeit, beim TRANSRAPID-Speisekonzept lange Wicklungsabschnitte (bis zu 3 km Länge) mit Energie zu versorgen und die Energieaufbereitung in Wechselrichtern vorzunehmen, die im Abstand von etwa 10 km entlang der Strecke postiert sind. Über ein Telemetriesystem wird die genaue Lage des Fahrzeugs ermittelt, so daß die präzise Zuordnung der Ströme zu den dreisträngig ausgeführten Wicklungen vom Wechselrichter aus (lageabhängig) erfolgen kann. Die erzielbaren Wirkungsgrade dieses Langstator-Konzepts sind vergleichbar denjenigen moderner rotierender Antriebe. Der Vorteil der Lincartechnik besteht wie bereits erwähnt in der Möglichkeit auf Steigungsstrecken entsprechend erhöhte Schubwirkungen zu erzielen, ohne daß zusätzliche fahrzeuggebundene Komponenten benötigt werden. Auch für Beschleunigungsstrecken stehen grundsätzlich deutlich größere Schubwerte zur Verfügung. Sie finden ihre Grenze allerdings in dem leistungsbedingten Aufwand für die Ausstattung der Unterwerke. Durch den Wegfall der Räder wird eine insgesamt strömungsgünstigere Ausführung der Schwebefahrzeuge ermöglicht, so daß deren Schubbedarf sinkt und der Energiebedarf je Sitzplatz und Kilometer (bei gleicher Geschwindigkeit) niedriger liegt als bei vergleichbaren Zügen der Rad-Schiene-Technik. Die strömungstechnisch günstigere Fahrzeugkontur (mit weitgehend glatter Oberfläche auch im unteren Teil des Fahrzeugbereiches) dürfte auch dafür verantwortlich sein, daß deutlich geringere Geräuschpegelwerte (etwa 6 dB weniger als bei der ICE-Variante bei hohen Geschwindigkeiten) gemessen wurden. Da bei niedriger Geschwindigkeit das Rollgeräusch der Räder entfällt, ist unterhalb von 200 km/h der Geräuschunterschied besonders markant.

Die aufgeständerte Fahrbahnausführung ist zwar in erster Linie in Verbindung mit der besonderen Stütztechnik (anziehende Kräfte unterhalb der Fahrbahnkante) zu sehen, ermöglicht aber vorteilhafterweise auch durch Variation der Länge der Stützen einen Niveaueausgleich im welligen Gelände. Der Flächenbedarf für die Bahn ist gering und eine Zerteilung des angrenzenden Geländes kann vermieden werden. Durch bessere Steigfähigkeit und vergleichsweise enge Kurvenradien (in Verbindung mit großen seitlichen Führkräften) ermöglicht die aufgeständerte Fahrbahn ein Minimum an Bodenbewegung und Tunnelbau. Im Vergleich zur Ausführung von Hochgeschwindigkeitstrassen der Rad-Schiene-Technik ergeben sich besonders im Bereich des welligen Geländes wirtschaftliche Vorteile für die Magnetschwebevariante.

Für die in Aussicht genommene Verbindung der beiden Millionenstädte Hamburg und Berlin durch die TRANSRAPID-Magnetschwebebahn soll die wirtschaftliche Nutzung mit etwa 15 Millionen Passagieren pro Jahr erreicht werden. Züge, die im Abstand von ca. 15 Minuten untertags verkehren und die beiden Städte in weniger als einer Stunde erreichen lassen, könnten die nötige Attraktivität für die Fahrgäste repräsentieren.

## Die Anwendung der Supraleitung bei abstoßenden Systemen

Die in Japan vollzogene Entwicklung der EDS-Technik wurde in mehreren Großversuchen auf einer etwa 7 Kilometer langen Fahrbahn (auf dem Versuchsgelände von Mizajaki) demonstriert. Eine zunächst mit Fahrwegspulen auf dem Boden eines U-förmigen Fahrwegs ausgestattete Fahrbahn, deren Erregung vom Fahrzeug aus mit supraleitenden Spulen erfolgte, demonstrierte die grundsätzliche Brauchbarkeit des Tragsystems, aber auch dessen technische Grenzen in Bezug auf Schwingungsanregung, Verluste (Energiebedarf gedeckt über die Antriebsleistung) und Magnetfeldbelastung im Fahrgastbereich. Durch den später vollzogenen Übergang auf eine geänderte Spulenordnung im Fahrzeug (8-förmige Spulen im vertikalen Bereich des U-förmigen Fahrwegs) sowie auf die Anwendung gefedert angeordneter supraleitender Magnete im Fahrzeug und die Vermeidung von Erregerspulen im Mittelteil der Fahrzeuge hofft man, reduzierte Schwingungsanregung (erhöhten Fahrkomfort), geringere Magnetfeldbelastung im Fahrgastbereich und etwas kleinere Verluste durch das Tragsystem zu erzielen. Es mag interessieren, daß der Vorschlag für die nun gewählte modifizierte Tragspulenordnung ein Ergebnis der Untersuchungen ist, die Mitte der 70er Jahre zum Thema EDS-Technik in Braunschweig durchgeführt worden sind.

Für 1996 wird in Japan die Fertigstellung einer neuen Versuchsanlage (Yamanashi-Projekt) erwartet, auf der die Anwendbarkeit der neuen EDS-Variante erprobt und entschieden werden soll. Stellt man eine vergleichende Betrachtung zur EMS-Technik an, so fällt auf, daß für Trag- und Vortriebstechnik bei der EDS-Variante ein erhöhter Aufwand an Spulen (Spulenmaterial Kupfer) zu treiben ist und der Anspruch des „Sicheren Schwebens“ zwar ohne (redundant auszuführende) Elektronik, aber mit Einbezug einer höchst sophisticateden Kühltechnik (flüssiges Helium bei 4,3 K) für die supraleitenden Spulen im Fahrzeug und mit einem sehr kostenträchtigen großen Anteil an supraleitendem Material (5–6 % des Fahrzeuggewichts) erreicht wird. Nach gegenwärtigem Stand müssen Magnetausfälle deswegen vermieden werden, weil hierdurch eine stark unsymmetrische Führkraftverteilung zumindest ein kurzzeitiges Anlaufen an der seitlichen Begrenzung des Fahrweges zur Folge hat. Das „Sichere Schweben“ verlangt „quenchsichere“ Magnete. Die Versuche haben außerdem gezeigt, daß der zunächst gewählte einfache Fahrzeugaufbau ohne Federn zwischen Magnet und Fahrzeug trotz des großen Spalts (mechanischer Spalt etwa 10 cm) den angestrebten Fahrkomfort nicht gewährleistet. Dies und die notwendige Schirmung der Fahrgasträume führt auf eine deutliche Gewichtsvergrößerung.

Die Entwicklungsarbeiten in Japan haben somit die ursprünglich angestrebten einfachen technischen Lösungen als nicht realisierbar gezeigt und deuten auch darauf hin, daß selbst in der neuesten Version die EDS-Variante eine stark verlustbehaftete Tragtechnik ist. Ihre Entwicklungsfähigkeit zu weiter optimierten Lösungen erscheint begrenzt.

In diesem Zusammenhang ist interessant, daß die in den letzten Jahren demonstrierten Erfolge der Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL) eine neue Perspektive für die Magnettragtechnik eröffnen. Obgleich die vorliegenden Materialdaten eine unmittelbare Anwendung noch nicht zulassen, besteht zumindest die Vision einer möglichen weitreichenden Verbesserung. Das Ziel kann so beschrieben werden, daß die verhältnismäßig großen Verlustleistungen der EDS-Technik stark (etwa auf ein Drittel) reduziert werden können und die abstoßenden Kräfte zur Erzielung einer stabilen Gleichgewichtslage durch Wechselwirkung zwischen stromführenden Fahrwegschienen und im Fahrzeug angebrachten supraleitenden Monolithen erzielt wird. Die Wirkung der supraleitenden Körper entspricht dabei derjenigen feldabweisender Schirme und zeichnet sich dadurch aus, daß sowohl eine stabile Tragfunktion als auch eine ausreichend steife Führfunktion (also eine 2-dimensional stabile Trag/Führkombination) entsteht (Bild 7). Nach den bislang durchgeführten rechnerischen Untersuchungen könnte dieses Verfahren in Zukunft zu einer Stützung mit Spalten von etwa 2 cm führen und dabei Stützkraftdichten von etwa 50 kN/m<sup>2</sup> ergeben. Das supraleitende Material wird in der Form schmelz-texturierter Einkristalle (YBCO) hergestellt. Ein interessanter Gesichtspunkt der HTSL-Stütz-

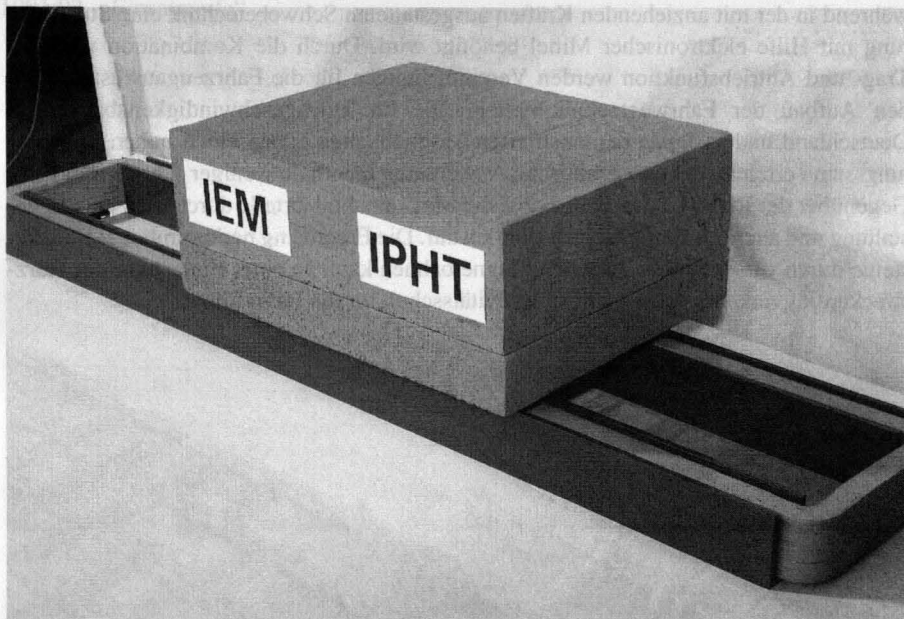


Bild 7  
Magnetschwebemodell (Trag- und Führkräfte),  
HTSL in Wechselwirkung mit Stromschienen

technik ist die gegenüber metallischen Supraleitern deutlich effizientere Kühltechnik auf der Grundlage von z.B. flüssigem Stickstoff bei 77 K. Durch die abstoßende Wirkung der Stützkkräfte läßt sich die Schienenanordnung günstiger als bei anziehender Technik in eine Fahrbahnebene integrieren. Man kann davon ausgehen, daß auch die Schubkraft-erzeugung etwa mit einem Langstator-Linearmotor so vollzogen wird, daß das Fahrweg-teil des Motors in der Fahrbahnoberfläche in ebener Ausführung eingelegt ist. Um hohe Wirksamkeit eines eisenlosen Linearantriebes zu erreichen, empfiehlt sich die Anwen-dung von HTSL-Blöcken mit Feldeinprägung, die ähnlich wie Permanentmagnete, je-doch mit noch höheren Remanenzwerten (etwa bis 3 Tesla) arbeiten. Es erscheint damit auch die Ideallösung einer Magnetschwebevariante möglich, die bis in die Fußgänger-zonen von Städten eingebracht werden kann. Neben der umweltfreundlichen technischen Ausführung ist damit auch die gewünschte hohe Anpassungsfähigkeit von Fahrbahnaus-führungen sichtbar geworden.

### **Zusammenfassung**

Für den Linearantrieb und Erzeugung magnetsicher Stütz- und Führkräfte werden Felddichten zwischen 0,5 und etwa 3 Tesla herangezogen. Durch Anwendung von Su-praleitern, lassen sich die Kräfte stabil wirkend zur Stützung von Fahrzeugen verwenden, während in der mit anziehenden Kräften ausgestatteten Schwebetechnik eine Stabilisie-rung mit Hilfe elektronischer Mittel benötigt wird. Durch die Kombination von z.B. Trag- und Antriebsfunktion werden Vereinfachungen für die Fahrzeugausrüstung und den Aufbau der Fahrwegtechnik erzielt. Die für Hochgeschwindigkeitsbahnen in Deutschland und in Japan demonstrierten Möglichkeiten haben einen hohen Entwick-lungsstand erreicht, der eine praktische Anwendung innerhalb weniger Jahre ermöglicht. Gegenüber der Rad/Schiene-Bahn weist die Magnetbahn Vorteile durch die Fahrwegge-staltung und auch die Betriebseigenschaften auf. Die Ergänzung herkömmlicher Bahnsy-teme durch verschleißfrei gestützte Magnetbahnen kann zu einer Entlastung des Kurz-streckenflugverkehrs und einem Attraktivitätsschub für die Bahn führen.

**Tabelle 1:**  
**Chronologie der Magnetschwebetechnik**

1896	US-Patent Linearmotor
1912	Weltausstellung Paris, Schwebemodell
1934	Reichspatent, H. Kemper Schwebefahrzeuge
1939	Stützung durch Supraleiter W. Braunbeck
1955	Stützung durch Ferrit-Magnete (Theorem v. Earnshaw 1842)
1967	US-Patent Nullflußverfahren Powell u. Danby
1969	Beginn TRANSRAPID-Entwicklung
1970/71	MBB-, KM-Prinzipfahrzeuge
1974	IEM, TUBS, Integrierte Magnetfahrtechnik
1977	Systementscheid
1979	TR05 Hamburg (30 to)
1982	TR06, TVE (120 to)
1988	TR07, TVE 450 km/h
1991/92	„Einsatzreife“